

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

GUILHERME CONSUL FINKLER

**USO DE TÉCNICAS INVESTIGATIVAS CONVENCIONAIS E DE ALTA
RESOLUÇÃO APLICADAS NA ELABORAÇÃO DE UM MODELO CONCEITUAL
DE UMA ÁREA CONTAMINADA POR HIDROCARBONETOS**

PORTO ALEGRE

Julho 2018

GUILHERME CONSUL FINKLER

**USO DE TÉCNICAS INVESTIGATIVAS CONVENCIONAIS E DE ALTA RESOLUÇÃO
APLICADAS NA ELABORAÇÃO DE UM MODELO CONCEITUAL DE UMA ÁREA
CONTAMINADA POR HIDROCARBONETOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato

Porto Alegre

Julho 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Consul Finkler, Guilherme

USO DE TÉCNICAS INVESTIGATIVAS CONVENCIONAIS E DE
ALTA RESOLUÇÃO APLICADAS NA ELABORAÇÃO DE UM MODELO
CONCEITUAL DE UMA ÁREA CONTAMINADA POR
HIDROCARBONETOS / Guilherme Consul Finkler. -- 2018.
45 f.

Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Modelo Conceitual de Área. 2. Investigação de
alta resolução. 3. investigações convencionais. 4.
Hidrocarbonetos. I. Roehe Reginato, Pedro Antonio,
orient. II. Título.

GUILHERME CONSUL FINKLER

**USO DE TÉCNICAS INVESTIGATIVAS CONVENCIONAIS E DE ALTA RESOLUÇÃO
APLICADAS NA ELABORAÇÃO DE UM MODELO CONCEITUAL DE UMA ÁREA
CONTAMINADA POR HIDROCARBONETOS**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 05/07/2018 pela Comissão avaliadora constituída por:

Banca Examinadora:

Professor Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato

Professor Msc. Marcos Imério Leão

Professor Msc. Alex Bortolon de Matos

Conceito: ____

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família pelo apoio, pelo investimento em mim e por todo o amor durante todos esses anos de graduação.

Agradeço aos meus tios Ivan e Tânia pelo apoio, pela convivência, ensinamentos e por serem exemplos de pessoas a serem seguidas.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas pela estrutura e professores que permitiram uma formação de qualidade.

Agradeço ao professor Pedro Antonio Roehe Reginato pela orientação, atenção e ensinamentos passados durante a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos que tornaram todo esse trajeto mais leve com carinho, apoio e risadas.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo comparar os resultados obtidos nas investigações de uma área contaminada por hidrocarbonetos feita com o uso de técnicas convencionais e de alta resolução e, assim, avaliar a influência do uso das diferentes técnicas na elaboração de modelos conceituais de área (MCA). O trabalho apresenta a metodologia de diferentes abordagens para investigação do meio físico e da contaminação primeiramente com o uso de ferramentas e técnicas convencionais e, em um segundo momento, com o uso de ferramentas de alta resolução. Os resultados apontam presença de contaminante em fase livre, identificado nos poços e nas sondagens. A sondagem HPT também indicou heterogeneidades no solo com a ocorrência de três camadas distintas, uma camada selante entre duas camadas mais permeáveis. Nessa camada selante também foi constatado fase retida de contaminante. A conjugação dos dados resultou em uma pluma de contaminação muito maior e comportamentos com o meio físico até então desconhecidos, com isso, o estudo demonstra as limitações das técnicas convencionais, que mesmo resultando em uma vasta rede de monitoramento, foi incapaz de diagnosticar e produzir um MCA adequado. Este novo cenário permitiu um melhor entendimento das dinâmicas da contaminação, reforçando o potencial e a necessidade do uso de ferramentas de alta resolução.

Palavras-chave: Modelo Conceitual de Área, investigação de áreas contaminadas, hidrocarbonetos.

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, o-Xileno, m-Xileno, p-Xileno
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CPRM	Serviço Geológico Brasileiro (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
MCA	Modelo Conceitual da Área
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
<i>USEPA</i>	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
HPT	<i>Hydraulic Profiling Tool</i>
OIP	<i>Optical Image Profile</i>

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PERCENTUAL DE PRODUÇÃO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO NAS REFINARIAS BRASILEIRAS (NOGUEIRA, 2003).	3
FIGURA 2 - COMPORTAMENTO LNAPL E DNAPL EM GRANDES VOLUMES (HERON INC, 2017)	5
FIGURA 3 - COMPORTAMENTO DO DNAPL NO SOLO (HASAN, 1996)	6
FIGURA 4 - EXEMPLO DE FORMAÇÃO DE FASES DE CONTAMINAÇÃO POR LNAPL (HASAN, 1996).....	6
FIGURA 5 - EXEMPLO DE SONDAGEM POR TRADO MANUAL (GEOSCAN, 2018).....	9
FIGURA 6 - SONDAGEM <i>DIRECT PUSH</i> COM LABORATÓRIO MÓVEL (FINKLER, 2016).....	10
FIGURA 7 - PERFIL LITOLÓGICO COM POÇOS DE MONITORAMENTO (FREIRE, 2014)	13
FIGURA 8 - PLUMA DE FASE DISSOLVIDA DE BENZENO (FREIRE, 2014).	13
FIGURA 9 - SONDAGEM COM PERFURATRIZ <i>HOLLOW</i> (FONTE: EDC AMBIENTAL, 2011).....	16
FIGURA 10 - ILUSTRAÇÃO POÇO DE MONITORAMENTO CONSTRUÍDO PELA EMPRESA X.	16
FIGURA 11 - POÇO DE EXTRAÇÃO (FINKLER, 2016).....	17
FIGURA 12 - (A) PONTEIRA PARA ANÁLISE DE HPT E (B) PONTEIRA DE SONDAGEM INVESTIGAÇÃO HPT/EC (FONTE: GEOPROBE, 2018).	19
FIGURA 13 - EXEMPLO SONDAGEM COM ANÁLISE SIMULTÂNEA DE HPT, PID, EC. (FONTE: GEOPROBE, 2018).	19
FIGURA 14 - SONDAGEM <i>DIRECT PUSH</i> EM CAMPO (FONTE: GEOPROBE, 2018).....	20
FIGURA 15 - POLÍGONO SOBRE MALHA QUADRICULADA.....	21
FIGURA 16 - PLANTA DO EMPREENDIMENTO.....	22
FIGURA 17 - PLUMA DE FASE LIVRE APARENTE COM POTENCIOMETRIA.	25
FIGURA 18 - PONTOS DE SONDAGENS OIP E HPT.	26
FIGURA 19 - RESULTADO DAS INVESTIGAÇÕES (A) HPT, (B) OIP-08 E C) OIP 09.	27
FIGURA 20 - RESULTADO DAS INVESTIGAÇÕES (A) OIP-06 E (B) OIP-07.	27
FIGURA 21 - PERFIL DAS SONDAGENS HPT E OIP.	29
FIGURA 22 - PLUMA DE CONTAMINAÇÃO COM POTENCIOMETRIA DEFINIDA POR MÉTODOS CONVENCIONAIS.....	29
FIGURA 23 - PLUMA CONTAMINAÇÃO POR FASE LIVRE ATUALIZADA.....	30

LISTA DE TABELAS:

TABELA 1 – COMPARATIVO ENTRE MÉTODO E A INFORMAÇÃO OBTIDA (FONTE: COLUMBIA TECHNOLOGIES, 2018).....	12
TABELA 2 - RESULTADO MONITORAMENTO DE POÇOS	24

Sumário

1 Introdução	1
2 Objetivos.....	2
2.1 Objetivo geral.....	2
2.2 Objetivos específicos	2
3 Revisão bibliográfica	3
3.1 Hidrocarbonetos	3
3.2 Contaminação de solos e água subterrânea por Hidrocarbonetos.....	4
3.3 Métodos Investigativos.....	8
3.3.1 Métodos Convencionais.....	8
3.3.2 Métodos Avançados de Investigação - <i>HRSC</i>	11
3.4 Modelo Conceitual de Área	12
4 Material e Métodos	15
4.1 Histórico da Área.....	15
4.2 Investigação Convencional	15
4.3 Investigação com Uso de Ferramentas de Alta Resolução	18
5 Resultados e Discussões	22
5.1 Área de Estudo.....	22
5.2 Geologia local.....	23
5.3 Hidrogeologia.....	23
5.3 Investigação por métodos convencionais.....	23
5.4 Investigação por técnicas de alta resolução	26
5.6 Avaliação do Uso de Diferentes Técnicas de Investigação na elaboração de MCAs	30
6 Conclusão.....	32
Referência Bibliográfica.....	33

1 Introdução

O Brasil é um grande produtor e consumidor de combustíveis derivados de petróleo. De 2007 a 2016 as vendas nacionais pelas distribuidoras superaram 980 milhões de m³ (ANP, 2017). O transporte, armazenamento e comercialização desse grande volume de produto estão sujeitos a acidentes e podem causar impactos negativos ao ambiente e a saúde de pessoas.

Somente entre maio de 2002 e dezembro de 2017 foram contabilizados 5.492 registros no Cadastro de áreas contaminadas e reabilitadas apenas no estado de São Paulo (CETESB, 2017). Desse montante, 4.284 ou 72% do número total de áreas registradas é referente aos postos de combustíveis, tornando esse tipo de empreendimento o maior responsável pelo número dos casos confirmados de contaminação no solo. Além de ser a modalidade de maior ocorrência de contaminação, o comércio de combustíveis tem especial atenção por seu potencial danoso a saúde humana. Os combustíveis, por serem formados por uma mistura complexa de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, - entre eles benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, os chamados BTEX - agem como depressores do sistema nervoso central e apresentam toxicidade mesmo a baixas concentrações (AMARAL et al, 2017).

Portanto, empreendimentos que comercializam combustíveis são classificados como atividades potencialmente poluidoras e estão sujeitos a avaliação. Se houver indícios de contaminação, a área passará a ser investigada, inicialmente para confirmar se existe contaminação e posteriormente para detalhar as características da contaminação e do meio (CONAMA, 2009). Essas fases possuem várias etapas com diferentes objetivos. As investigações geram modelos conceituais da área (MCA) cada vez mais detalhados, algo imprescindível e de grande importância para a avaliação e remediação de áreas contaminadas, além de ser constantemente atualizado com as novas investigações. A confiabilidade de um modelo está relacionada com os dados que foram obtidos nas sucessivas etapas de investigação da área, isso porque, dependendo das técnicas empregadas, os dados serão de maior ou menor nível de detalhe. Nesse contexto, a investigação detalhada se faz crucial para o planejamento das ações de remediação futura. A má execução nessa etapa acaba gerando dados de baixa qualidade e inconsistentes que vão nortear avaliações de risco e projetos de remediação, os quais resultam em remediações ineficientes e custos globais mais altos (RIYIS, 2012).

Assim, esse trabalho visa discutir os resultados obtidos pelas diferentes técnicas de investigação divididas aqui em métodos convencionais e de detalhe e, por fim, produzir um Modelo Conceitual da Área (MCA).

A área de estudo consiste num terminal de abastecimento de combustíveis no estado de São Paulo. No passado, foi alvo de investigações realizadas por diferentes empresas de consultoria ambiental que utilizaram técnicas e abordagens distintas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é comparar os resultados obtidos com a investigação de uma área contaminada feita por técnicas convencionais e de alta resolução visando, então, avaliar a influência do uso de diferentes técnicas na elaboração de modelos conceituais de área.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Discutir e apresentar graficamente os resultados obtidos nas investigações ditas convencionais.
- b) Avaliar e apresentar graficamente os resultados da campanha de investigação de alta resolução.
- c) Construir um Modelo Conceitual da Área (MCA) a partir dos dados obtidos por ambos os métodos de investigação.

3 Revisão bibliográfica

3.1 Hidrocarbonetos

Hidrocarbonetos derivam principalmente de petróleo. De composição química bastante variável, é constituído basicamente por hidrogênio e carbono (somando mais de 90%) e em menores quantidades por enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais (THOMAS, 2001). A alta percentagem de carbono e hidrogênio existente no petróleo mostra que sua composição é basicamente formada por hidrocarbonetos. O petróleo, no estado natural, não tem muita utilidade, porém após sucessivas operações para separar as frações desejadas, processá-las e industrializá-las obtemos os produtos de ampla aplicação comercial (CEPA, 1999 apud VINHOZA, 2005). Durante o refino, os constituintes do petróleo se distribuem em várias frações em função do processo de destilação, obtendo produtos como lubrificantes, diesel, gasolina, asfalto, etc. A figura 1 apresenta em termos percentuais o perfil de produção desses derivados nas refinarias brasileiras (NOGUEIRA, 2003 apud VINHOZA, 2005)

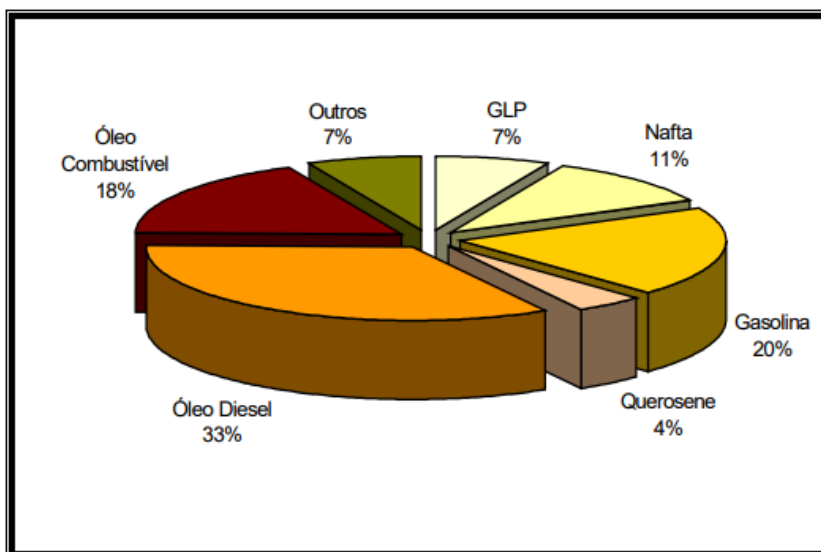


Figura 1—Percentual de produção de derivados de petróleo nas refinarias brasileiras (Nogueira, 2003).

Como é evidenciado pelo gráfico, a gasolina e o diesel juntos representam mais da metade do total de produtos derivados de petróleo. A gasolina e o diesel são formados por uma mistura complexa de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, entre eles benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, os chamados BTEX que agem como depressores do sistema nervoso central e apresentam toxicidade mesmo a baixas concentrações. O benzeno destaca-se como o principal composto de relevância toxicológica, devido aos seus efeitos à saúde humana, com efeito carcinogênico (AMARAL et al, 2017).

Logo, o manuseio, o transporte e a comercialização de derivados de petróleo devem ter especial atenção, pois a maior parte de seus derivados apresenta alto risco de explosão e incêndios, além do risco silencioso que reside na exposição devido à moléculas que possuem elevado potencial cancerígeno, como é o caso dos BTEX.

3.2 Contaminação de solos e água subterrânea por Hidrocarbonetos

Solo é definido como material proveniente da decomposição de rochas pela ação de agentes físicos ou químicos podendo ou não ter matéria orgânica (ABNT, 1995). Produto do intemperismo, o solo é constituído por grãos minerais, matéria orgânica e espaços vazios preenchidos com ar e/ou água, sendo comumente dividida em zona saturada e zona não saturada. A zona saturada fica abaixo da superfície freática e nela todos os vazios existentes estão preenchidos com água. A superfície freática está submetida à pressão atmosférica. Já a zona não saturada ou zona vadosa situa-se entre a superfície freática (zona capilar) e a superfície do terreno, sendo que nela os poros estão parcialmente preenchidos por gases (ar e vapor d'água) e por água.

As águas de subsuperfície ou águas subterrâneas são fontes importantes para o abastecimento e reservas estratégicas de água. Sua proteção está prevista pela resolução CONAMA 420 (CONAMA, 2009).

Nesse contexto, os hidrocarbonetos de petróleo são um risco em potencial quando ocorre alguma contaminação em subsuperfície, sendo que esse produto pode formar cinco fases de contaminação: livre, residual, vapor, dissolvida e adsorvida. As fases livre e residuais são o produto puro (parcial ou totalmente imiscível) com a diferença quanto a sua mobilidade. Na livre, o produto apresenta mobilidade, inclusive podendo ser bombeada, ao passo que a fase residual corresponde a gotas ou agrupamentos pequenos isolados no meio poroso, não apresentando mobilidade. A fase vapor é a parte volatilizada que se encontra na zona não saturada do solo. Na fase adsorvida, moléculas do composto interagem físico-quimicamente prendendo-se à superfície das partículas do solo, principalmente em solos com alto teor de argilas e/ou matéria orgânica. E por fim, a fase dissolvida que corresponde a parcela do produto que se dissolve na água subterrânea (Valentin, 2006).

Fase líquida não aquosa (NAPLs) são hidrocarbonetos presentes de forma separada, de fase imiscível quando em contato com a água e/ou ar. As diferenças nas propriedades físicas e químicas entre a água e os NAPL resultam numa interface que previne a dissolução total entre os dois fluidos (USEPA, 2015). Os NAPL são classificados em dois grupos:

- *LNAPL – Light Non-Aqueous Phase Liquid* (fase líquida leve não aquosa, ou seja, líquido imiscível e menos denso do que a água).

- **DNALP – Dense Non-Aqueous Phase Liquid** (fase líquida densa não aquosa, ou seja, líquido imiscível e mais denso do que a água).

Devido à diferença na densidade esperam-se comportamentos distintos quando há contaminação por estes grupos.

A fase livre dos LNAPL quando lançada na superfície do terreno exposto, migram através da zona não saturada de solo até a zona de capilaridade, acima do nível de água subterrânea. Os componentes solúveis migrarão mais à frente dos componentes menos solúveis e ao atingir a zona de capilaridade, onde a água preenche a maior parte dos poros, as forças de capilaridade reduzirão o movimento vertical do LNAPL, que ao final atinge a saturação residual. Nesta zona, o LNAPL tende a parar a migração vertical e migrar horizontalmente ao longo do topo da zona de capilaridade (HASAN, 1996 apud HASEN, 2013).

A fase livre dos DNAPL apresenta alta densidade e normalmente possui baixa viscosidade e pouca solubilidade em água. Esta combinação faz com que o DNAPL migre através da zona não saturada e, se estiver em pequena quantidade, cesse seu movimento quando atinge a saturação residual. Se a quantidade de DNALP for elevada, o mesmo irá percolar, através da franja de capilaridade onde sofrerá resistência ao movimento vertical. Contudo, caso o volume seja suficiente para elevar a carga hidráulica a ponto de superar as forças capilares ao longo da zona saturada, o contaminante DNALP poderá atingir maiores profundidades até encontrar uma zona impermeável e se espalhar horizontalmente. Partes de seus compostos podem passar para a fase gasosa contida na zona não saturada e partes dos componentes mais solúveis podem passar para a fase dissolvida na zona saturada (HASAN, 1996 apud SILVA, 2005).

Na figura 2 está representado o comportamento distinto no meio físico da contaminação em grande volume por LNAPL e DNAPL.

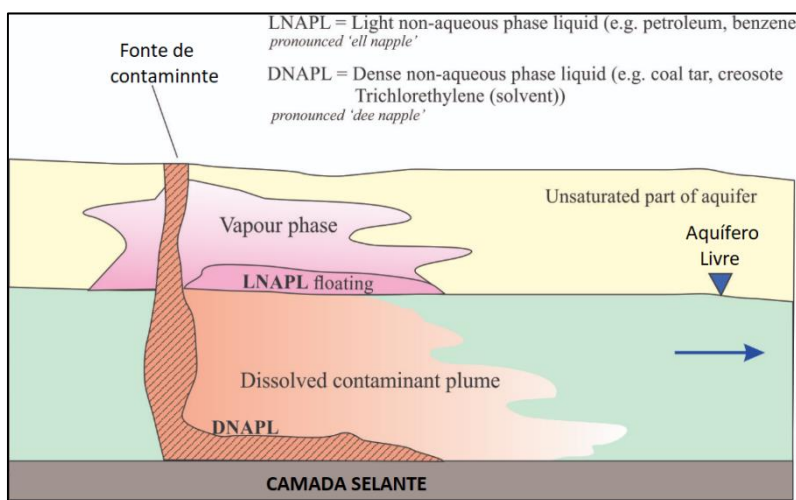


Figura 2- Comportamento LNAPL e DNAPL em grandes volumes (HERON INC, 2017)

A figura 3 apresenta o modelo teórico da dispersão de fase livre de DNALP de alta viscosidade em pouco volume. Isso faz com que o contaminante em fase livre fique retido na zona não saturada.

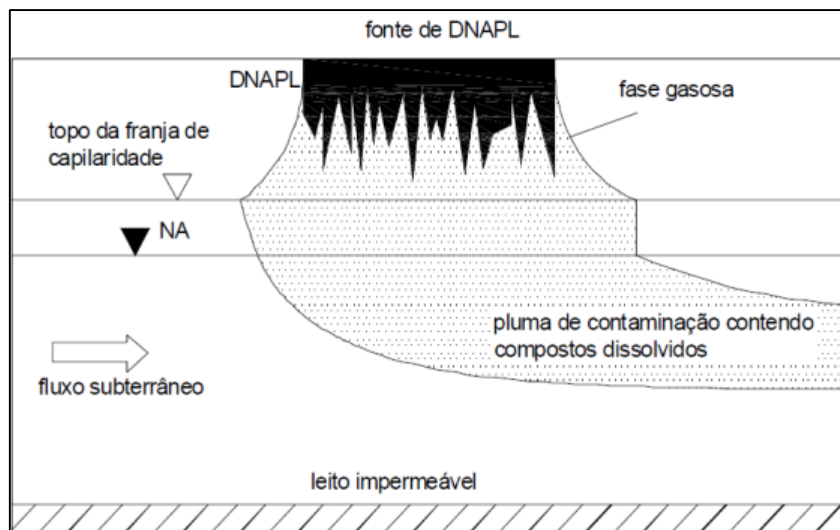


Figura 3 - Comportamento do DNAPL no solo (HASAN, 1996)

Os LNAPL são comuns na produção, refino e distribuição do petróleo. Consequentemente, os mais presentes quando ocorre contaminação deste tipo, como a gasolina e o óleo diesel. Já os DNAPL estão relacionados principalmente as atividades industriais (MARQUES; GUERRA, 2017). Quando ocorrem vazamentos de NAPLs os contaminantes se apresentam em diversas fases e podem passar de uma para a outra de acordo com suas propriedades físico-químicas e das condições ambientais (figura 4).

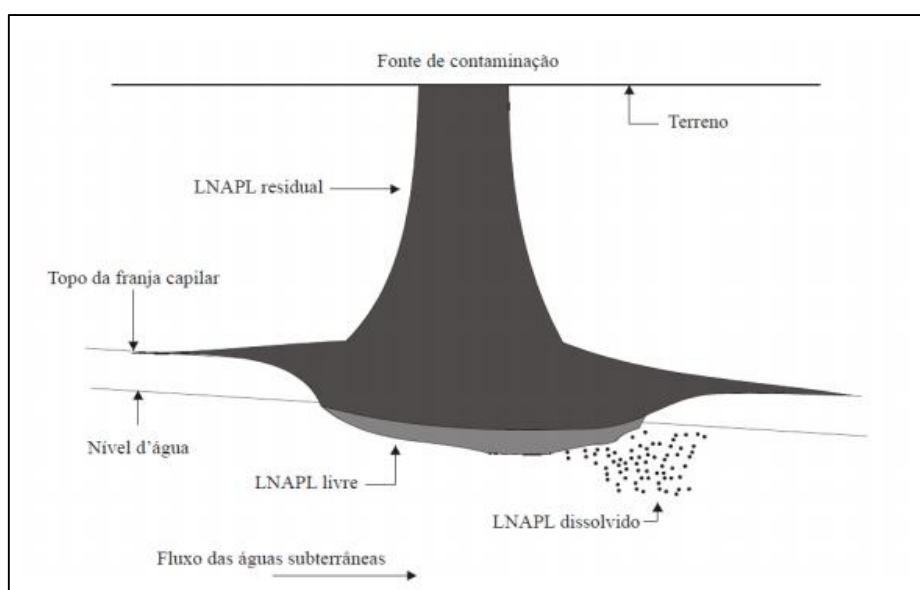


Figura 4 - Exemplo de formação de fases de contaminação por LNAPL (HASAN, 1996)

A fase adsorvida e a fase residual se distribuem na zona de dispersão entre a fonte e o nível freático. A primeira caracteriza-se por uma fina película de hidrocarbonetos adsorvidos na matéria orgânica e minerais do solo, enquanto a segunda permanece retida por forças capilares nos poros do solo (MARQUES; GUERRA, 2017). Isso varia de acordo com a viscosidade do produto, da porosidade do solo e das oscilações do lençol freático. Embora apresentem pouca mobilidade, funcionam como fonte permanente de contaminação das águas subterrâneas pela lenta e contínua liberação de produtos para as fases vapor e dissolvidas (NRC, 1994 apud MARQUES; GUERRA, 2017)

A fase dissolvida se origina da dissolução de aditivos polares e por uma fração de hidrocarbonetos que possuem maior solubilidade. Hidrocarbonetos em fase dissolvida formam a chamada pluma de contaminação (MARQUES; GUERRA, 2017).

A fase vapor se constitui como a fase gasosa de componentes voláteis dos hidrocarbonetos e ocupa os poros do solo. Pode estar presente em meio as demais fases, mas é mais significativa na região vadosa do subsolo. Os hidrocarbonetos em fase vapor podem existir como componentes de vapor do solo, podendo condensar-se e absorver-se na superfície sólida ou dissolver-se na água subterrânea. A partição entre as fases líquida e gasosa do solo é determinada pela pressão de vapor da substância e sua solubilidade em água, sofrendo influência da umidade do solo (MARQUES; GUERRA, 2017).

Outro fator determinante para saber a forma que se dará a distribuição da fase livre está relacionado com as características do solo (composição, granulometria, porosidade, condutividade hidráulica). Por exemplo, solos com maior porosidade oferecem menor resistência à dispersão, sendo que nesse caso a dispersão dos LNAPL será mais uniforme horizontalmente. Essa forma uniforme é também denominada de “modelo panqueca”. Em solos com menor porosidade, o espalhamento ocorrerá de forma mais lenta, resultando em menores velocidades de dispersão, originando plumas de fase livre mais espessas e com menores áreas (ABEMA, 2009).

Um critério que pode ser utilizado para o fechamento do perímetro de ocorrência em meio físico de substâncias químicas associadas a fontes de contaminação consiste nos valores das investigações. Para o mapeamento da ocorrência de contaminação no solo, no plano horizontal, deve ser considerado que o limite da pluma será interpolado na metade da distância entre o ponto de amostragem cujo valor de investigação for superior e o ponto de amostragem cujo valor for inferior ao limite aceitável de concentração da substância química de interesse (CETESB, 2009). Para o caso de fase livre, a delimitação se dará pela interpolação entre os pontos de amostragem com presença e os pontos de amostragem sem a presença de fase livre (IPT, 2014).

3.3 Métodos Investigativos

A avaliação dos efeitos do processo de infiltração de hidrocarbonetos de petróleo no subsolo é possível através de investigações ambientais que envolvem uma gama de procedimentos bastante variável, devido as peculiaridades de cada caso.

Segundo Costa (COSTA, 2003), os fatores que mais influenciam na escolha da metodologia mais adequada para cada caso são:

- Condições geológicas;
- Condições hidrogeológicas;
- Quantidade e tipo de produto infiltrado;
- Caracterização da infraestrutura de serviços locais (rede de esgoto, redes de abastecimento de água, energia elétrica, gás etc.);
- Caracterização da vizinhança, principalmente com relação a garagens subterrâneas;
- Estruturas de captação de água subterrânea como poços e cisternas na área e arredores;
- Distribuição dos elementos citados acima.

Os objetivos da investigação são variáveis podendo ser divididos em duas grandes fases. A primeira fase são as etapas de avaliação preliminar e investigação confirmatória, na qual busca a confirmação de que a área está contaminada. A segunda fase visa traçar um plano de investigação buscando um maior nível de detalhamento, a fim de caracterizar a distribuição da substância química de interesse e identificar as heterogeneidades do meio físico. A etapa de investigação detalhada servirá de base para a elaboração do modelo conceitual com maiores níveis de informação e na elaboração do plano de intervenção (CONAMA, 2009).

Com o surgimento de novas ferramentas de investigação de alta resolução, a coleta de dados a nível de detalhe se torna mais eficaz que as ferramentas tradicionais, possibilitando a elaboração de um MCA mais adequado (RIYIS, 2013).

3.3.1 Métodos Convencionais

Tradicionalmente, utilizava-se equipamento de sondagem e percussão como trados manuais e mecanizados para investigações de solo. A descrição das técnicas, bem como as suas limitações, são apresentadas na NBR 15492 (ABNT, 2007) que trata de sondagens de reconhecimento para fins ambientais. Durante a realização das sondagens por trado manual, o material escavado é amostrado, separado e agrupado de acordo com as características tátil-visual e profundidade. A coleta das amostras deve ser realizada quando há mudança nas características ou composição do solo,

sendo que as mesmas devem ser acondicionadas em sacos de lona ou plásticos com amarelo (ABNT, 1986). As amostras devem ter suas características físicas descritas e são utilizadas na elaboração de perfis litológicos (ABNT, 2001). Essa prática é desaconselhada para investigação ambiental, pois o solo é revirado pelo trado, consequentemente, as amostras não representam o perfil litológico na sua totalidade. A figura 5 é um exemplo de sondagem por trado manual.



Figura 5 - Exemplo de sondagem por trado manual (Geoscan, 2018)

Outro método de perfuração é o trado helicoidal oco (*Hollow stem auger*). Ferramenta muito utilizada na instalação de poços de monitoramento por evitar o desmoronamento ou deslizamento da parede do furo enquanto o revestimento do poço está sendo instalado. Durante a perfuração pode ser realizada amostragem de duas formas: a primeira, não indicada, seria a coleta de amostras obtidas durante a perfuração, isto é, o material trazido pelas hélices ou preso ao trado após a retirada do furo; a segunda, também feita durante a perfuração, com o uso de amostrador contínuo que avança com o trado oco ou cravado no material inalterado a profundidade desejada durante uma pausa na perfuração (ABNT, 2007). A técnica permite a coleta de amostras deformadas e indeformadas, além de testes e descrição das camadas. Uma das desvantagens na utilização do trado helicoidal oco é que a amostra de solo trazida à superfície pela hélice do trado é modificada, tornando difícil a determinação da profundidade precisa da amostra.

A amostragem de solo por cravação contínua ou *Direct Push*, figura 6, é um método recomendado por órgãos ambientais nacionais e internacionais para investigação geoambiental de áreas contaminadas. Ela é utilizada principalmente para coletas de amostras para análises químicas e para elaboração de um perfil hidroestratigráfico (Riyis et al, 2013). O método consiste na cravação de um amostrador especial no solo que avança utilizando força hidráulica ou mecânica, até a profundidade desejada. O amostrador possui uma abertura na parte inferior por onde o material entra enquanto é cravado no solo. Hastes são utilizadas para aprofundar o amostrador. Ao amostrar a profundidade desejada, o amostrador e as hastes são trazidos à superfície e, depois de removido, pode ser feita a análise visual e determinar

o intervalo de amostra. Pode ser associado a outros sistemas para, por exemplo, ser inserido em um furo previamente aberto para amostragem. Entre as suas desvantagens, o pequeno diâmetro da perfuração torna difícil a selagem do furo e os poços de monitoramento não geram grandes volumes de água, o que inviabiliza alguns testes no aquífero.



Figura 6 - Sondagem *Direct Push* com laboratório móvel (Finkler, 2016)

Além da composição do solo, o fluxo de água subterrânea também é um importante fator a ser determinado, pois indica os caminhos preferenciais da água subterrânea. A partir da medição da carga hidráulica de cada poço (relação entre o nível estático e a cota da boca do poço) é possível definir as linhas equipotenciais, a rede de fluxo e seus caminhos preferenciais.

De acordo com isso, um instrumento importante e permanente que permite o acesso direto ao aquífero e a água subterrânea é o poço de monitoramento, o mesmo deve fornecer dados confiáveis para a obtenção de amostras representativas da área, para isso, a execução deve seguir as especificações da NBR 15.495 (ABNT, 2001). O poço de monitoramento consiste em um tubo de uma, duas, quatro ou seis polegadas revestido de material inerte aos compostos químicos possivelmente existentes na área, constituído por uma porção de material filtrante e porção cega e instalado em sondagem específica para este fim. Entre a coluna de revestimento/filtro e a sondagem deve ser mantido espaço que será preenchido com material filtrante tais como areia grossa ou cascalho, para evitar que o material natural migre para o interior do poço. O espaço anular acima do nível da água subterrânea deve ser preenchido com material selante, para isolar o meio saturado e evitar o risco de possível contaminação direta da superfície. Na superfície, o poço deve possuir laje de proteção e tampa de proteção com cadeado (AESAS, 2008). Existem diferentes tipos de poços de monitoramento projetados para diferentes objetivos e particularidades do projeto.

A investigação da fase vapor pode ser feita por amostragem do poço de monitoramento. Os métodos de amostragem envolvem a retirada e acondicionamento de gases que podem ser feitas em sacos amostradores Tedlar, vasilhas de silicone Canister, tubos adsorventes sólidos, entre outros. Posteriormente, as amostras são encaminhadas para laboratório e analisadas por cromatografia ou espectometria de massa. A EPA estabelece procedimentos de amostragens e construções de poços de monitoramento, bem como a aplicabilidade e escopo de cada método (USEPA, 1996).

Outros procedimentos de medição de gases no solo são citados pela Cetesb (CETESB, 2007), como por exemplo:

- Cravação de sonda de tubo aberto com pequeno diâmetro (2,5 cm ou menos) até a profundidade de um metro com medição dos gases por analisadores adaptados a mangueira;
- Uso de perfuratriz para construção de pequenos furos no solo. Após a retirada da perfuratriz é imediatamente inserida uma sonda metálica de diâmetro inferior ao da broca, ligada a uma mangueira de material plástico e conectada a analisadores de gases;
- Amostra de solo coletada na cava. O torrão coletado deve ser armazenado em saco plástico impermeável. Posteriormente, os torrões são quebrados manualmente (sem abrir o recipiente) e a amostra agitada vigorosamente, a mesma deve permanecer em repouso por 10 minutos antes da mediação, que pode ser feita por detectores do tipo PID (*photoionization detector*) ou FID (*flame ionization detector*).

3.3.2 Métodos Avançados de Investigação - HRSC

Investigação de alta resolução ou *High Resolution Site Characterization (HRSC)* são estratégias e técnicas usadas em medições adequadas à escala e com a maior densidade de amostra para determinar a distribuição de contaminantes e o contexto físico em que reside, além de garantir remediações de áreas mais rápidas e mais efetivas (USEPA, 2013). É um método do qual são utilizadas ferramentas e técnicas intrusivas dotadas de sensores que fornecem grande quantidade de dados físicos e químicos ao mesmo tempo em que a intrusão no solo avança em profundidade. Os dados obtidos em escala de detalhe com alta densidade de amostras pontuais permitem definir a distribuição vertical dos contaminantes e caracterizar em escala que podem chegar a centímetros, as heterogeneidades hidrogeológicas da área, diminuindo as incertezas e garantindo um modelo conceitual mais refinado. Uma investigação que utiliza ferramentas de investigação de alta resolução garante dados mais confiáveis, em maior quantidade e de forma mais rápida. Algo que os métodos convencionais de investigação são incapazes de realizar (Riyis et al, 2013 apud Santos et al, 2015).

De acordo com Riyis (RIYIS, 2012), as ferramentas de alta resolução podem ser divididas em dois grandes grupos: as de caracterização química ou distribuição de contaminantes e as de avaliação do meio físico. Como exemplos de caracterização química ou simplesmente distribuição de contaminante temos: *MIP (Membrane Interface Probe)*, *OIP (Optical Image Profile)*, *LIF (Laser Induced Fluorescence)* e Laboratório Móvel. Para avaliação física do meio existem: *HPT (Hydraulic Profiling Tool)*, *PST (Pneumatic Slug Test)*, *EC (Electrical Conductivity)*, *CPT/CPTu (Cone e Piezonocone Penetrometer Test)*, *RCPTu (Piezocone de Resistividade)*, entre outros. Na tabela, 1 são apresentadas algumas ferramentas e suas aplicações. Deve-se destacar que os resultados adquiridos com a aplicação dessas técnicas são obtidos diretamente no campo. Isso possibilita investigações mais dinâmicas conforme os resultados.

Tabela 1– Comparativo entre método e a informação obtida (Fonte: Columbia Technologies, 2018).

Método	Alvo da investigação
MIP (<i>Membrane Interface Probe</i>) Ex.: MIP, MiHpt, MIP-HTL, LL MIP etc.	Compostos voláteis Ex.: Hidrocarbonetos
LIF (<i>Laser Induced Fluorescence</i>) Ex.: UVOST, ROST, TarGOST, FFD etc.	Fase residual e livre de hidrocarbonetos Ex.: gasolina, diesel, óleos etc.
OIP (<i>Optical Image Profiler</i>)	Fase residual e livre de hidrocarbonetos. Ex.: gasolina, diesel, óleos etc
Laboratório Móvel Ex.: GC, GCMS, HPLC	COV, COSV Metais, Gases
HPT (<i>Hydraulic Profiling Toll</i>)	Perfil hidroestagráfico, Condutividade hidráulica
EC (<i>Electrical Conductivity</i>)	Condutividade elétrica do solo, composição do solo
CPT/CPTu (<i>Cone and Piezonocone penetrometer Test</i>)	Características e comportamento do solo
PST (<i>Pneumatic Slug Test</i>)	Condutividade hidráulica

3.4 Modelo Conceitual de Área

A resolução CONAMA 420 (CONAMA, 2009) estabelece diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas e com potencial de contaminação. A classificação das áreas varia em função do potencial poluidor, das informações obtidas no decorrer do tempo e das ações de intervenção adotadas. As investigações de uma área avançam inicialmente de uma avaliação preliminar para investigação confirmatória e, por último, para a investigação detalhada. Desde a primeira etapa de avaliação da área já deve ser desenvolvido um modelo conceitual inicial a partir do levantamento do histórico da área, plantas com as instalações e possíveis fontes de contaminação, bens a proteger, etc... (ABNT, 2007). O modelo conceitual inicial é o primeiro esboço da área e esse modelo deverá ser constantemente atualizado com o

passar das etapas de investigação até se atingir um modelo que compila todos os dados obtidos até etapa de investigação detalhada, passando a chamar-se modelo conceitual da área (MCA).

O modelo conceitual de área é uma ferramenta importante que reúne todas as informações obtidas sobre a contaminação e a área nas sucessivas etapas de investigação. Segundo a USEPA (USEPA, 2016), o modelo conceitual de área (MCA) ou *conceptual site model* (CSM) é um conjunto sumário gráfico e escrito do que se sabe ou se supõem sobre a contaminação ambiental e as suas interações chaves com as características do meio que são pertinentes para a tomada de decisão. O MCA é um compilado de dados sobre o ciclo de vida da contaminação e das investigações, no entanto, deve-se ter em mente que essa plataforma contém incertezas e lacunas de informações sobre o histórico da área e operação, geologia, hidrogeologia e hidrologia; fontes de contaminação, mecanismos de liberação, destino e transporte; potenciais receptores e caminhos de exposição. O desenvolvimento de um MCA acurado é vital para o projeto e as tomadas de decisão. A figura 7 e 8 são exemplos gráficos de um modelo conceitual de área que avaliou as concentrações de fase dissolvida de benzeno.

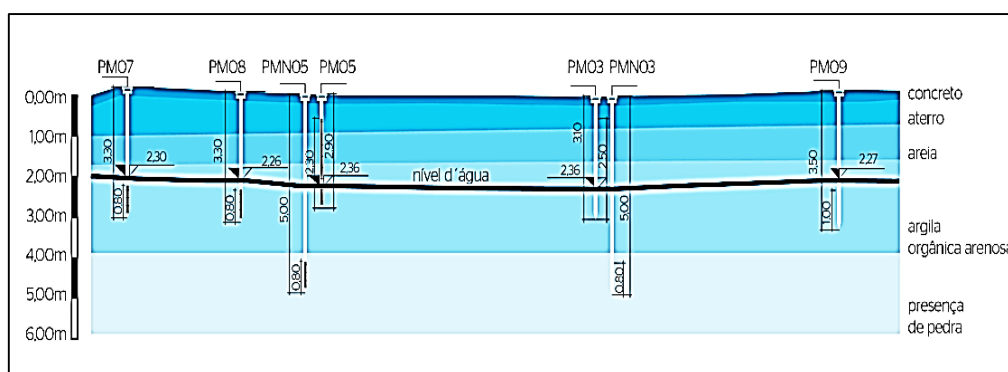


Figura 7 - Perfil litológico com poços de monitoramento (FREIRE, 2014)

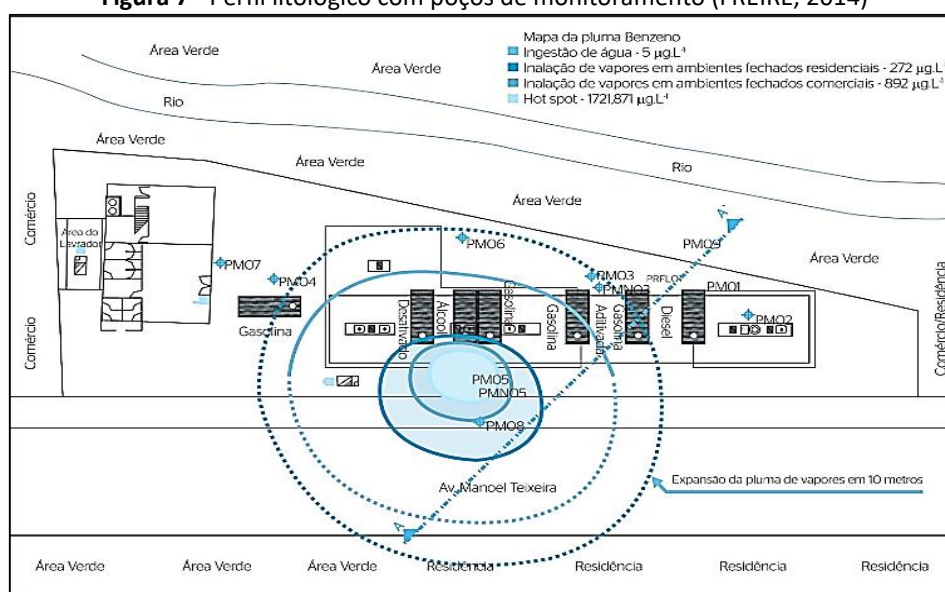


Figura 8 - Pluma de fase dissolvida de benzeno (FREIRE, 2014).

A CETESB (CETESB, 2017) define modelo conceitual como relato escrito, acompanhado de representação gráfica dos processos associados ao transporte de contaminantes desde as fontes potenciais primárias e secundárias até os receptores efetivos ou potenciais. Deve-se especificar as substâncias químicas de interesse, fontes de contaminação, mecanismos de transporte no meio e as vias de exposição aos receptores. Essa mesma decisão de diretoria recomenda a utilização de ferramentas de alta resolução na elaboração do MCA.

O modelo conceitual, portanto, é uma representação do que se sabe sobre a área contaminada, envolve muitas hipóteses, suposições e simplificações que devem ser constantemente avaliadas, confirmadas ou refutadas em todas as etapas do projeto, comparando-a aos dados obtidos em campo para testar se o modelo é satisfatório.

4 Material e Métodos

4.1 Histórico da Área

A área escolhida para a realização deste trabalho foi notificada pela CETESB em 2011 e desde então são realizadas investigações e projetos de remediação na mesma. Durante esse período, três empresas de consultoria ambiental atuaram no local em períodos diferentes. O trabalho tem enfoque nos estudos realizados pelas duas últimas empresas a realizarem trabalhos na área.

A empresa X atuou de 2014 a 2016 e atendeu aos padrões requeridos pelo órgão ambiental na data de sua elaboração. Os trabalhos utilizaram métodos convencionais e bem estabelecidos na época.

Em 2016 a empresa Y foi contratada para a implantação e condução das medidas de remediação ambiental necessárias ao empreendimento e desde então atua na área nesse sentido.

Os dados sobre o histórico da área, planta com as instalações do empreendimento, distribuição de poços de monitoramento e poços de extração, sondagens investigativas, entre outros foram retirados de três relatórios elaborados e cedidos pela empresa Y: o Relatório de Instalação do Sistema de Remediação Ambiental (Jun/16) (FINKLER, 2016), o Relatório de Operação do Sistema de Remediação Ambiental (Abri/17 a Jun/17) (FINKLER, 2017) e o Relatório de Investigação Ambiental Piloto de Alta resolução (HRSC) (FINKLER, 2018). Informações como: histórico de monitoramento dos poços (feitos pela empresa X e pela empresa Y) com registro de cotas, presença de fase livre, amostragem e nível d'água subterrânea; sondagens, instalação e perfil de alguns poços; usos adjacentes a área de estudo; resultados das investigações com o uso de ferramentas de alta resolução também constam nos relatórios citados acima.

4.2 Investigação Convencional

Os trabalhos ditos convencionais realizados na área foram de monitoramento da rede de poços, instalação de poços de monitoramento e análise de material escavado.

Na realização dos trabalhos de perfuração para instalação de poços, a empresa X fez uso de dois equipamentos diferentes. Para a instalação de poços de monitoramento rasos utilizou um trado mecanizado e para a instalação de poços de monitoramento profundo utilizou uma perfuratriz do tipo *Hollow*. A execução dessas sondagens seguiu a norma NBR 15.495-1 e NBR 15.495-2 (ABNT, 2001), sendo que ao todo foram instalados trinta e sete poços de monitoramento rasos, sete poços de monitoramento profundos e nenhum fluido foi utilizado nas perfurações. O material

escavado foi caracterizado tátil-visualmente e descrito na forma de perfil litológico para a caracterização da litologia local. Na figura 9 há um exemplo de sondagem com perfuratriz tipo *Hollow*. Não houve coleta de material escavado para análise química em laboratório (FINKLER, 2016).



Figura 9- Sondagem com perfuratriz *Hollow* (Fonte: EDC Ambiental, 2011)

Dos trinta e sete poços instalados pela empresa X, sete foram poços profundos com filtro e pré-filtro construídos a mais ou menos um metro e meio do fundo do poço. A parte superior foi selada com bentonita a fim de garantir a amostragem da camada mais profunda. As profundidades dos poços profundos variam de dezoito metros e meio a vinte e quatro metros e meio. As cotas dos poços também foram medidas e constam na ficha de campanha de monitoramento (FINKLER, 2017). A figura 10 mostra o perfil construtivo de um poço de monitoramento feito pela empresa X.

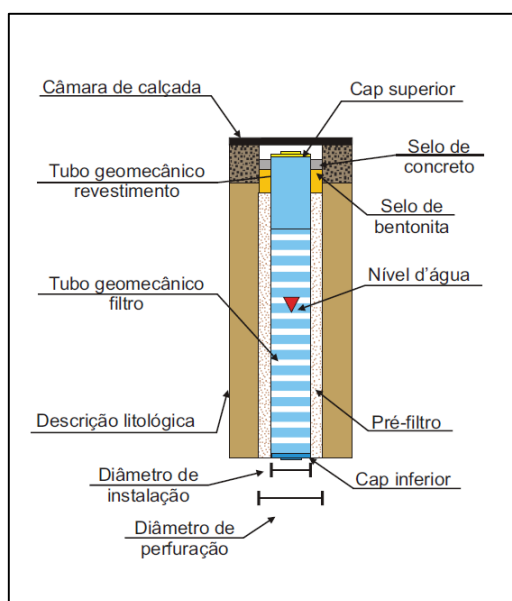


Figura 10 - Ilustração poço de monitoramento construído pela empresa X.

A empresa Y não executou sondagens para a construção de novos poços de monitoramento na área, contudo, treze novos poços rasos foram feitos para instalação do sistema de extração multifásica (MPE). O material escavado foi analisado tátil-visualmente e descrito na forma de perfis litológicos (FINKLER, 2016). A figura 11 representa um poço de extração (PE) utilizado para a instalação do sistema MPE, o equipamento utilizado na perfuração foi trado manual.

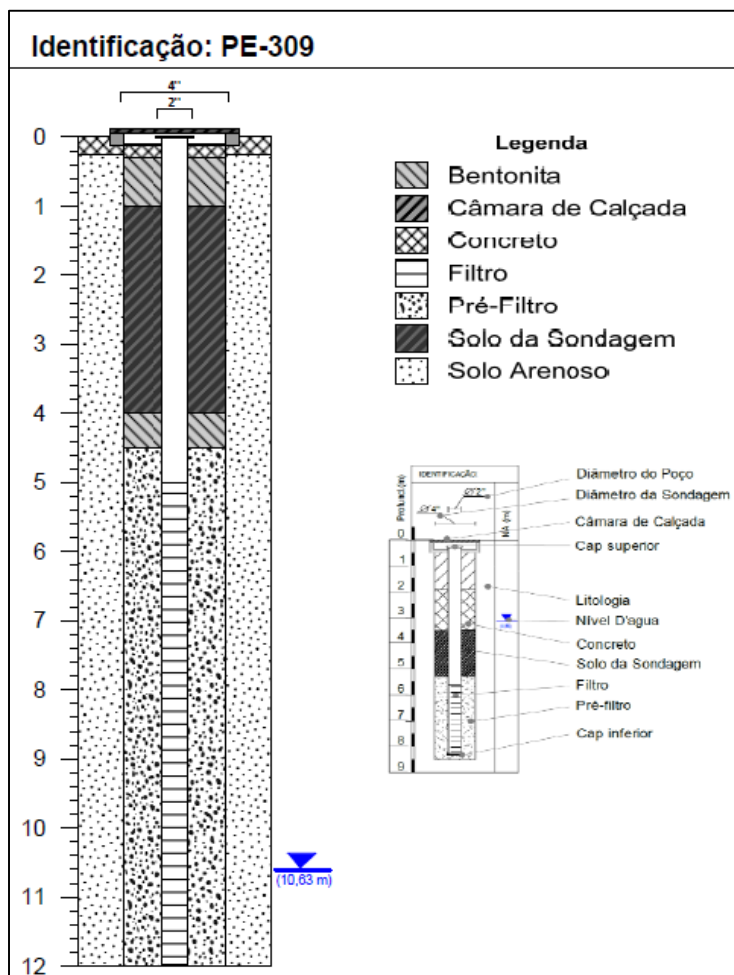


Figura 11 - Poço de extração (FINKLER, 2016).

Ambas as empresas realizaram monitoramento na rede de poços. O acompanhamento das condições hidrogeológicas foi feito a partir de medições de níveis d'água e eventuais espessuras de fase livre. Para tanto, utilizou-se medidor eletrônico de nível d'água e amostradores descartáveis (*bailers*), respectivamente. Ao constatar presença de fase livre, o tamanho da coluna era anotado. Quando esta era menor do que meio centímetro era anotado como película de fase livre. A empresa X amostrou e delimitou as plumas de fase dissolvida, pois a mesma empresa foi encarregada da análise confirmatória e posterior análise de risco à saúde humana. A empresa Y, contratada para a instalação e operação do sistema de remediação, monitorou o nível da água subterrânea e a presença de fase livre.

4.3 Investigação com Uso de Ferramentas de Alta Resolução

Um trabalho a parte feito pela empresa Y foi a investigação de fase livre e residual com refinamento da litologia a partir do uso de tecnologia HTP e PID.

O equipamento da marca Geoprobe, através do sistema de cravação contínua (*direct push*) - como exemplificado na figura 14 -, realiza medições em tempo real pelo sensor PID acoplado na sonda. Na figura 12b está representada uma sonda para testes simultâneos HPT, OIP e EC. Com o mesmo equipamento é realizado o ensaio de condutividade HPT, apenas substitui-se a ponteira (FINKLER, 2018).

O sistema HPT funciona injetando um fluido na formação e medindo a relação vazão/pressão de injeção para relacionar esse valor com a condutividade hidráulica (K) e permeabilidade do solo. O HPT foi desenvolvido com o intuito de criar perfis em alta resolução e em tempo real das propriedades hidráulicas do solo, consiste em um controlador, uma bomba, um cabo de transferência passado no interior das hastes de sondagem, um transdutor de pressão, uma barreira permeável e um computador de campo. À medida que a sonda avança no solo, a água é bombeada através do cabo interno para dentro do solo passando pela tela permeável. Na figura 12a está ilustrada uma sonda para teste HPT. O escoamento é regulado de modo a ser o mais constante possível. Desse modo, a pressão necessária para injetar um fluxo constante de água no solo, conhecida como pressão HPT, é monitorada pelo transdutor de pressão e registrada em computador em função da profundidade. O fluxo de água dentro do solo também é medido e registrado em função da profundidade e pode ser realizado simultaneamente com outros métodos como o MIP e EC (SANTOS et al., 2015).

A ferramenta PID consiste em uma lâmpada ultravioleta (UV) especial montada em uma célula eletrolítica termostaticamente controlada com baixo volume e fluxo contínuo. A temperatura é regulável e varia a partir da temperatura ambiente até 250°C. A lâmpada UV de 10,2 elétron-volt (eV) emite energia a um comprimento de onda de 120 nanômetros que é suficiente para ionizar a maioria dos compostos aromáticos tais como benzeno, tolueno, xileno, além de muitas outras moléculas, tais como Sulfeto de Hidrogênio (H₂S), Hexano e Etanol, cujo potencial de ionização é menor que 10,2 eV. Uma vez que o PID é não destrutivo, é frequentemente executado primeiro dentro de uma série de detectores de análises múltiplas numa única injeção (SANTOS et al, 2015). Quando há presença de LNAPL, as moléculas de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos irão absorver a energia da luz ultravioleta e emitir um fóton, que é fluorescência. Um *software* analisa os *pixels* da imagem capturada pela câmera e é capaz de identificar o tipo de combustível presente com base no padrão de cor da fluorescência. Se não houver nenhum contaminante que absorva e emita o fóton ou se estiverem em concentração insuficiente, a câmera registrará uma imagem totalmente preta (GEOPROBE, 2018). Entre as imagens da figura 13 há um exemplo de duas imagens do mesmo ponto: uma com fluorescência UV (tons de azul) e a correspondente análise da intensidade feita pelo software (em vermelho).

(a) Ponteira HPT

(b) ponteira conjugada HPT/EC/OIP

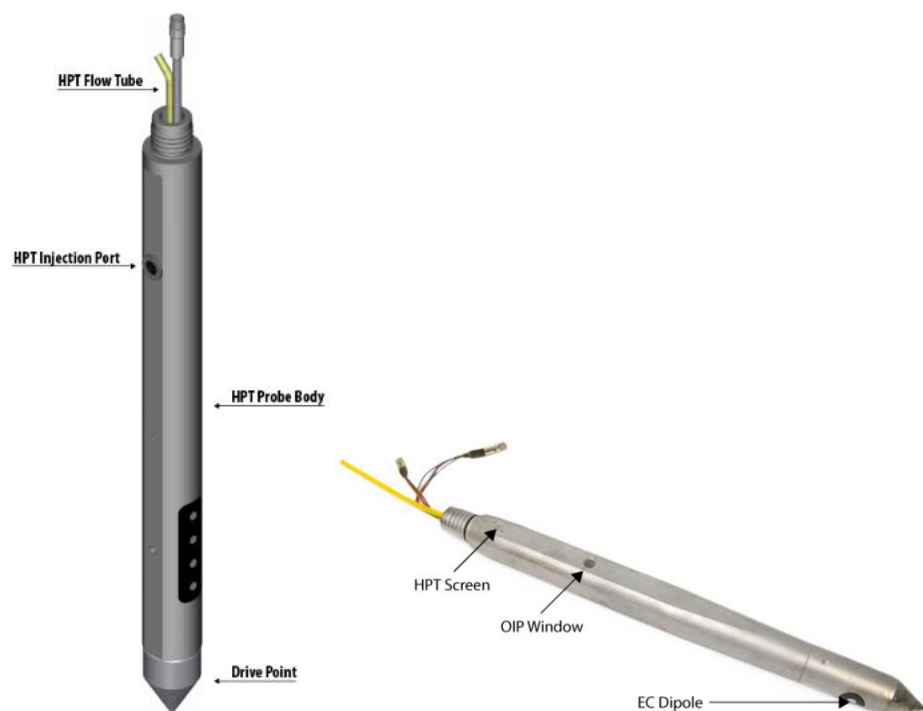


Figura 12 - (a) Ponteira para análise de HPT e (b) ponteira de sondagem investigação HPT/EC/OIP (Fonte: Geoprobe, 2018).

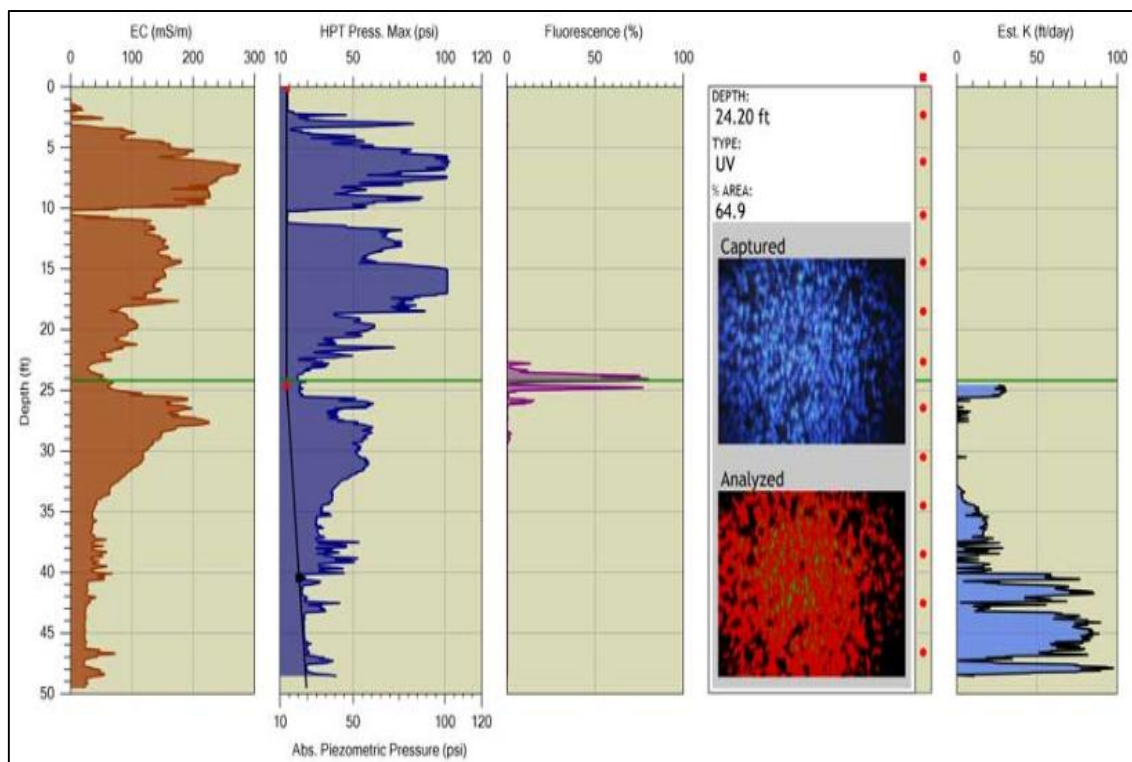


Figura 13 - Exemplo sondagem com análise simultânea de HPT, PID, EC. (Fonte: Geoprobe, 2018).



Figura 14 - Sondagem *Direct push* em campo (Fonte: Geoprobe, 2018)

4.4 Elaboração do Modelo Conceitual da Área

O conjunto de dados descritivos da área foi retirado do relatório de instalação dos sistemas de remediação ambiental (Jul/16) (FINKLER, 2016).

A análise dos empreendimentos circundantes foi realizada com o uso do *software Google Earth* gratuito. Dados como localização, planta com as instalações e malha de poços da área foram retirados do relatório citado anteriormente (FINKLER, 2016).

Para a delimitação das plumas de fase livre e das linhas potenciométricas, foi utilizado o *software Adobe Illustrator CC 2018*, ambas desenhadas pela interpolação dos pontos. O *software* é pago, porém possui uma versão gratuita temporária para discentes e professores do corpo acadêmico. O *Adobe Illustrator* se mostra uma excelente ferramenta para desenhos técnicos, com seu ótimo *design* possui ferramentas de desenho, ferramentas de equidistância, linhas guia, traço de linhas, criação de pontos, superfície, curvas, círculos, retângulos, *zoom in* e *out* etc.

Na campanha de monitoramento da rede de poços foram medidos o nível da água subterrânea e eventuais espessuras de fase livre. Esses dados foram utilizados para a elaboração do mapa potenciométrico e a delimitação das plumas de fase livre, respectivamente. Embora seja um bom *software* para desenhos que permite a construção e edição de *shapes* (camadas) isoladamente ou em conjunto, o programa *Adobe Illustrator* não possui a ferramenta que meça a área ou perímetro de polígonos diretamente. Para contornar esse problema, foi utilizado o método analítico gráfico de

quadrículas totais e parciais. É um método cartográfico bastante conhecido e que obtém resultados bem próximos aos valores reais (CAMPOS, 2007). O polígono é disposto sobre uma folha de papel milimetrado (no caso do *adobe Illustrator* a ferramenta “Guias” cria uma malha quadriculada de tamanho editável) como na figura 15.

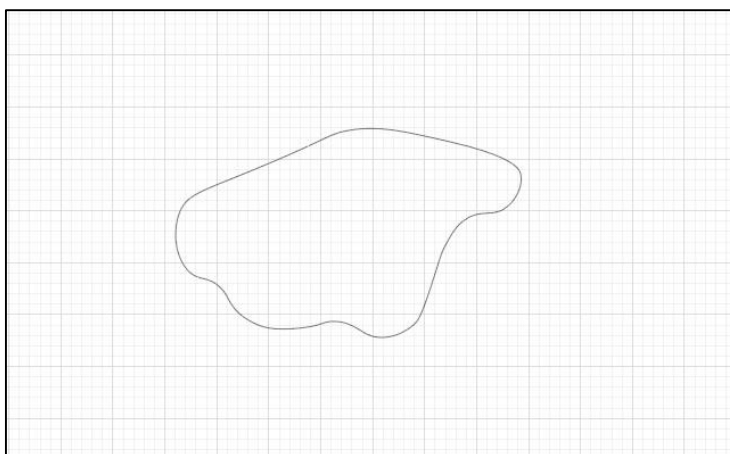


Figura 15 - Polígono sobre malha quadriculada.

A área é calculada pela equação $S = \sum \text{inteiros} + \frac{\sum \text{não inteiros}}{2}$ onde, $\sum \text{inteiros}$ é o somatório dos quadrados inteiros e $\sum \text{não inteiros}$ é o somatório dos quadrados não inteiros. O resultado da soma (S) é multiplicado pela área unitária de cada quadrado, respeitando a escala (CAMPOS, 2007). Para o estudo de caso utilizou-se a grade guia que representa um quadrado de 2mx2m na planta.

5 Resultados e Discussões

5.1 Área de Estudo

A área, objeto de estudo, consiste em um terminal de abastecimento de combustíveis. Nas suas instalações encontram-se tanques aéreos, caixas separadoras de água e óleo, plataforma de abastecimento (com carregamento e descarregamento), casa de máquinas e bombas, tubulações aéreas, linhas férreas, depósitos e escritórios para a administração (FINKLER, 2016). A figura 16 contém parte da planta do empreendimento com suas instalações.

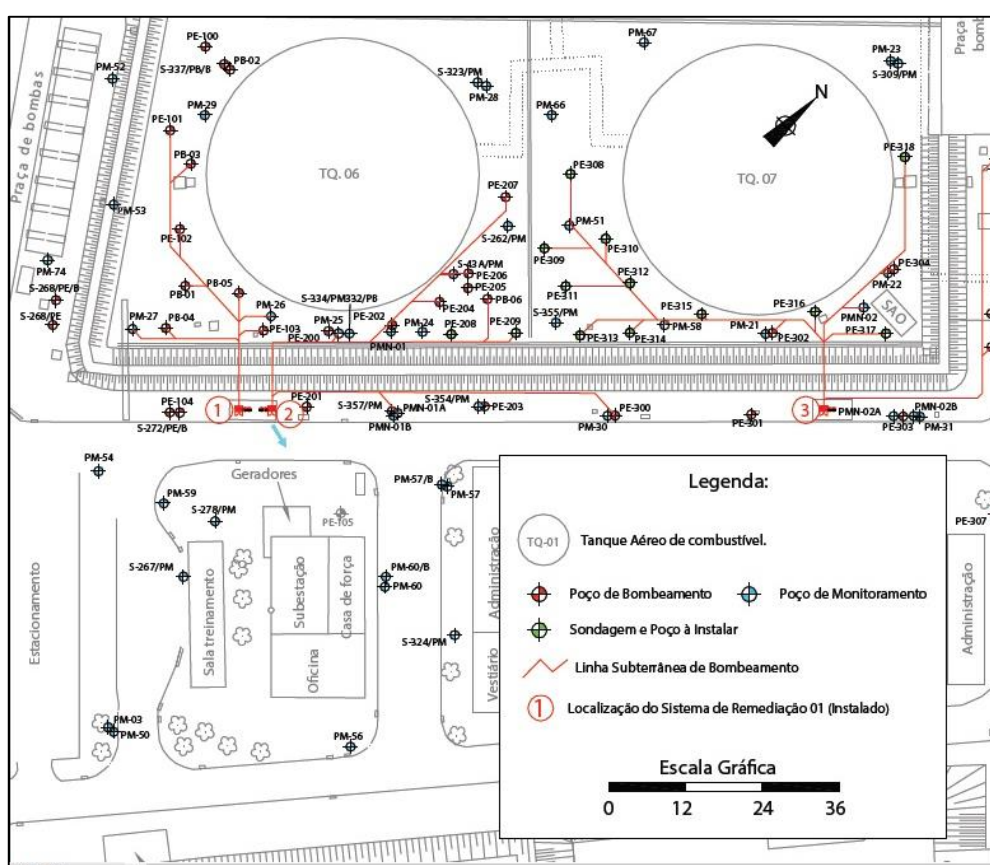


Figura 16 - Planta do empreendimento

Para não expor a empresa responsável pelo empreendimento, apenas parte da área estará presente nesse trabalho. A figura 16 contém 41 poços de monitoramento rasos e de bombeamento, 2 poços de monitoramento profundos, as linhas do sistema MPE e as instalações que estão presentes no corte da planta.

O empreendimento localiza-se em zona urbana com predominância de ocupações industriais e comerciais de médio a grande porte nas vizinhanças.

5.2 Geologia local

Durante as sondagens por trado mecânico e manual e perfuratriz *hollow* para a instalação dos poços de monitoramento foi feita a análise tátil-visual do material escavado. Com isso, verificou-se a existência de três unidades litológicas: argila, por vezes arenosa de cor variegada (marrom, amarelo e cinza); areia média, por vezes argilosa, de cor cinza a marrom, com presença dispersa de cascalho; e argila arenosa de cor cinza, por vezes com presença de matéria orgânica. A investigação do perfil litológico foi feita pela empresa X, vale ressaltar que este não é o método indicado para investigação da litologia, pois ocorre a mistura de solo das diferentes camadas e a identificação da profundidade exata do material torna-se difícil (ABNT, 2007).

5.3 Hidrogeologia

O teste HPT constatou três perfis distintos com distribuição apresentada na figura 17a. A primeira porção com coeficiente de permeabilidade aproximadamente igual a 10^{-2} cm/s, vai da superfície até a profundidade de 10,5 metros, sendo que nessa profundidade, o gráfico HPT apresentou uma queda abrupta atingindo valores de permeabilidade inferiores à 10^{-5} cm/s, valor que se manteve mais ou menos constante até a profundidade de 12,5 metros. A partir dos 12,5 metros, a permeabilidade voltou a subir atingindo valores próximos a 10^{-2} cm/s até a profundidade de 15m que representa o final do teste. Portanto, o perfil hidrogeológico da área é constituído por três camadas: duas de maior permeabilidade com uma camada de menor permeabilidade entre as elas. As linhas equipotenciais de nível d'água subterrânea apontam o fluxo na direção leste.

5.3 Investigação por métodos convencionais

Em maio de 2017, a empresa Y realizou campanha de monitoramento *in situ*, visto que a coleta de dados se limitou a investigação de presença de fase livre e medições do nível de água do aquífero freático. O monitoramento faz parte da série de relatórios de operação do sistema de remediação ambiental. Esses dados foram retirados do relatório emitido mais recentemente (FINKLER, 2017). A tabela 2 apresenta o resultado da campanha de monitoramento de maio de 2017, vale frisar que nem todos os poços foram monitorados.

Tabela 2 - Resultado monitoramento de poços

Poço	Cota (m)	Nível da Água (m)	Fase Livre (cm)	Carga Hidráulica (m)
		10/05/17	10/05/17	10/05/17
PB-02	588,40	9,29	0	579,11
PB-03	588,42	9,37	0	579,05
PE-100	588,40	9,30	0	579,10
PE-101	588,39	9,51	0	578,88
PE-102	588,55	9,82	0	578,73
PE-103	588,48	9,69	0	578,79
PE-104	588,28	9,77	5	578,51
PE-200	588,40	9,66	26	-
PE-201	588,34	9,74	0	578,60
PE-202	588,54	9,81	0	578,73
PE-203	588,27	9,85	0	578,42
PE-204	-	9,67	0	-
PE-205	588,44	9,70	18	578,74
PE-206	-	9,67	0	-
PE-300	588,21	10,16	0	578,05
PE-301	588,11	10,38	0	577,73
PE-304	588,20	10,56	0	577,64
PE-305	-	10,86	25	-
PE-407	588,33	9,57	0	578,76
PM-21	589,25	10,51	0	578,74
PM-22	588,30	10,58	0	577,72
PM-23	588,26	10,45	0	577,81
PM-24	588,58	9,69	0	578,89
PM-25	588,45	8,07	0	580,38
PM-27	588,38	7,04	0	581,34
PM-28	588,34	9,56	0	578,78
PM-29	588,28	9,37	0	578,91
PM-30	588,36	10,25	0	578,11
PM-31	588,34	10,62	0	577,72
PM-51	588,42	9,88	0	578,54
PM-53	589,96	10,97	0	578,99
PM-58	588,39	10,27	0	578,12
PM-67	-	9,80	0	-
PMN-01B	588,52	9,88	0	578,64
PMN-01	588,50	9,69	0	578,81
PMN-01A	588,48	9,98	0	578,50
S-262/PM	588,39	9,69	0	578,70
S-309/PM	588,41	10,60	0	577,81
S-323/PM	588,41	9,50	0	578,91

“-”: dados inexistentes.

Poço (m)	Cota (m)	Nível da Água (m)	Fase Livre (cm)	Carga Hidráulica (m)
		10/05/17	10/05/17	10/05/17
S-354/PM	588,38	9,86	0	578,52
S-355/PM	388,39	9,95	0	378,44
S-357/PM	588,47	9,70	0	578,77
S-43A/PM	588,39	9,48	0	578,91

“-”: dados inexistentes.

Na figura 17, foram identificados na planta os poços de monitoramento com presença de fase livre, as cargas hidráulicas dos poços, a potenciometria com o sentido de fluxo d'água subterrânea e as plumas de fase livre. O sentido preferencial das águas subterrâneas foi para leste.

Com o histórico de monitoramento, foi possível constatar que o período de menor nível de água subterrânea na área, medido na investigação de maio de 2014, foi de 12,5m. Vale ressaltar que 2014 foi um ano atípico de chuvas no estado de São Paulo. Provavelmente, uma possível explicação para tanta diferença nos resultados em relação a maio de 2017 que teve como menor nível 10,86 m.

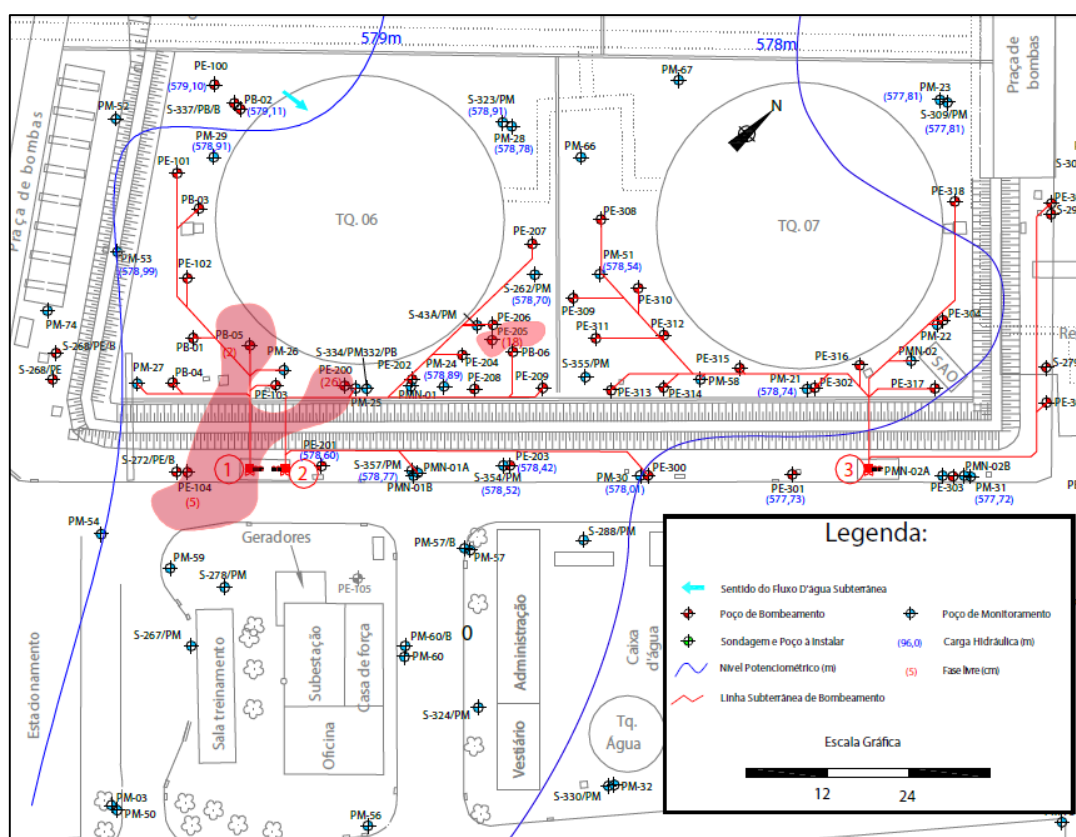


Figura 17 - Pluma de fase livre aparente com potenciometria.

5.4 Investigação por técnicas de alta resolução

Foram realizadas dez sondagens na área com *Direct Push* com sonda acoplada. Nove com o uso de sonda OIP para identificar as plumas com fase livre e uma sondagem HPT voltada para o refinamento da litologia. A distribuição dos pontos de sondagem na planta estão representados na figura 18.

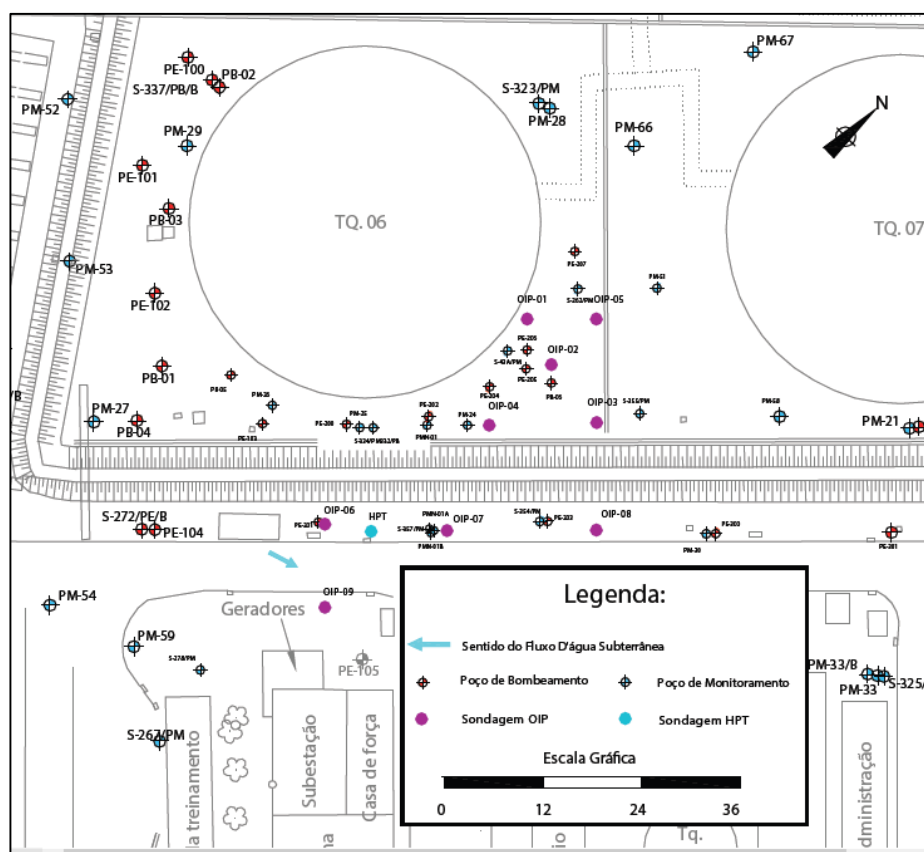


Figura 18 - Pontos de sondagens OIP e HPT.

Os pontos de investigações OIP-01 ao OIP-05 não apresentaram anomalias na zona não saturada (zero a 10 metros).

O ponto de investigação HPT indicou porção de alta permeabilidade de aproximadamente 10^{-2} cm/s em profundidade acima de uma camada selante. Entre 10,5m e 12,5 m com permeabilidade inferior à 10^{-5} cm/s. A partir de 12,5m até o final do teste em 15m de profundidade, a permeabilidade ficou próxima à 10^{-2} cm/s.

Os gráficos com os resultados das investigações OIP, que confirmaram a presença de contaminante juntamente com o resultado da sondagem HPT para comparação, estão apresentados nas figuras 19 e 20. Cada ponto de sondagem foi nomeado e identificado na planta.

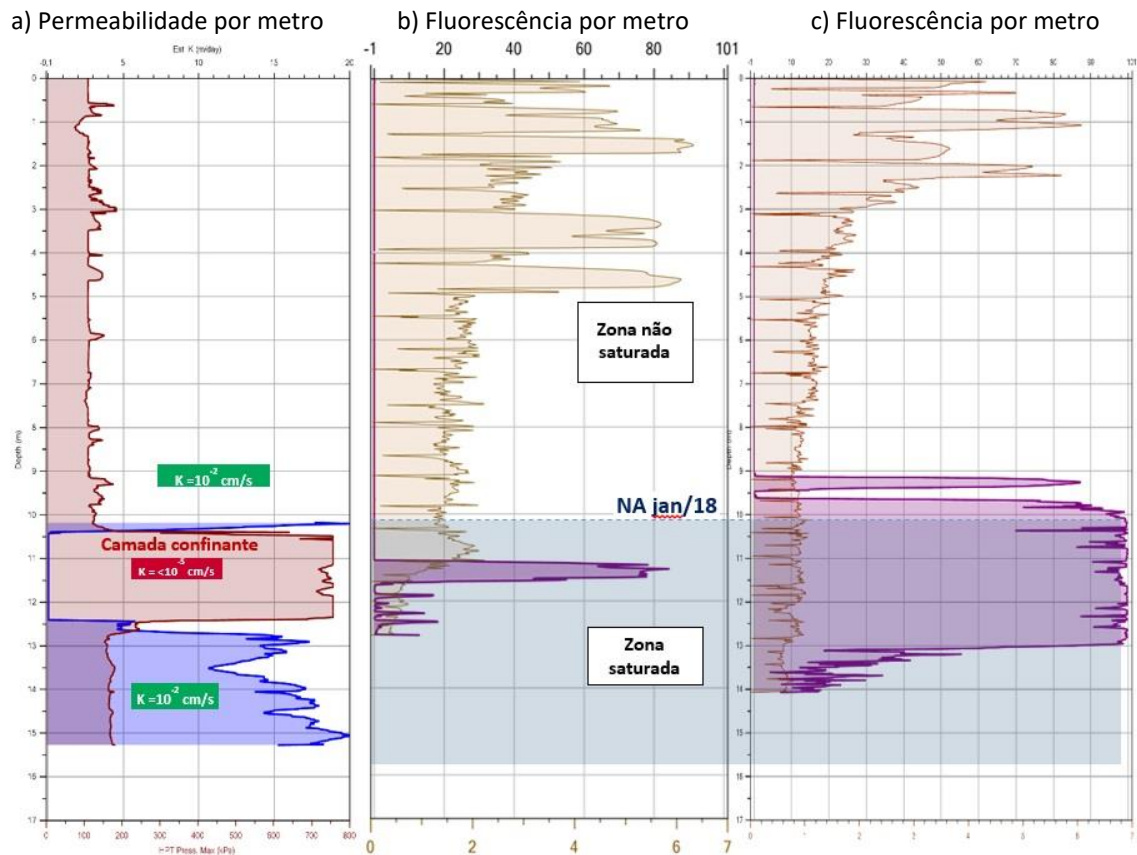


Figura 19 - Resultado das investigações (a) HPT, (b) OIP-08 e c) OIP 09.

a) fluorescência (%) por metro. (b) fluorescência (%) por metro.

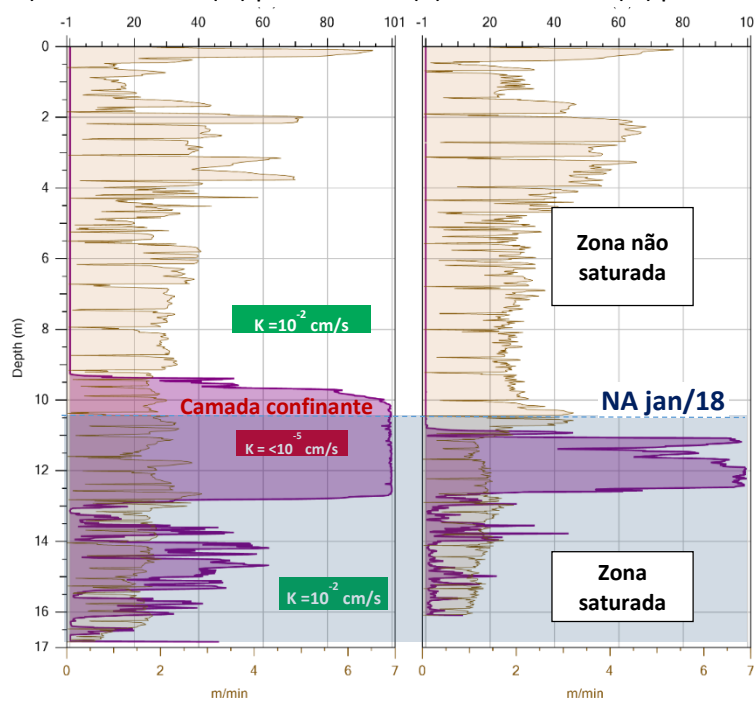


Figura 20 - Resultado das investigações (a) OIP-06 e (b) OIP-07.

Cada figura apresenta dois gráficos com dados de cada sondagem. O figura 19a apresenta o resultado do teste HPT, o gráfico em azul indica o valor da permeabilidade expresso em metros por dia, enquanto o gráfico em rosa indica o valor da pressão HPT em KPa. Os dados foram medidos simultaneamente durante o teste sendo possível perceber as alterações na faixa de profundidade de 10,5 m a 12,5 m (profundidade da camada selante). As demais figuras apresentam os resultados das sondagens OIP-06, OIP-07, OIP-08 e OIP-09. As figuras 19b, 19c, 20a e 20b contêm dois gráficos. Em rosa a taxa de cravação em metros por minuto da sonda no solo. Quanto maior o valor mais rapidamente a sonda esta avançando no solo. E em roxo o resultado da fluorescência em porcentagem, variando de 0% a 100%. 100% indica a presença de contaminante em fase livre ou em fase absorvida. Todos os registros gráficos, do teste HPT e das sondagens OIP, estão apresentados em função da profundidade.

Os pontos de investigação detalhada OIP-06 à OIP-09, feitos próximos à bacia do tanque-06, demonstram que a maior parte da contaminação (100% de fluorescência) encontra-se impregnada na camada mais impermeável, situada entre 10,5m e 12,5m. Também foi encontrada na segunda zona permeável, abaixo da zona impermeável, presença de contaminante em menores concentrações, como aponta o gráfico. Essa zona apresentou fluorescência maior que zero, porém inferior a 100% (de 20% a 50%).

5.5 Modelo conceitual da área - MCA

O perfil de contaminação com a litologia está apresentado na figura 21. Trata-se de um corte oeste/leste entre os pontos OIP-05 e OIP-08. Neste transecto também estão contidas as sondagens OIP-07 e HPT. Também estão contidos alguns poços nesse transecto: um de monitoramento (PM), dois poços de extração (PE) e dois poços de monitoramento profundo (PMN). Os perfis e cotas desses poços também foram representados na figura 21. Em vermelho, está desenhada a pluma de contaminação e a linha azul marca o nível d'água medido no teste HPT.

A figura 22 contém o resultado do monitoramento realizado em maio de 2017. Percebem-se duas plumas de fase livre distintas. A maior engloba 3 poços (PB-05, PE-104 e PE-200) e possui aproximadamente 336 m², enquanto a menor engloba 1 poço (PE-205) e possui aproximadamente 30 m².

Para a etapa final, foram considerados os valores da investigação convencional e da sondagem OIP. Para tanto, foi considerada cada sondagem que deu positivo para a presença de fase livre e delimitada a pluma juntamente com os valores da campanha de monitoramento anterior. A figura 23 apresenta o mapa com a nova pluma de contaminação. Os poços PE-201 e PE-203 vizinhos, as sondagens OIP-06, OIP-07 e OIP-

08 e que deveriam constatar presença de fase livre foram desconsiderados. Os poços PMN-01A e PMN-01B são poços profundos, logo, sua seção filtrante não foi capaz de identificar a pluma e o perfil do poço S-357/PM é desconhecido.

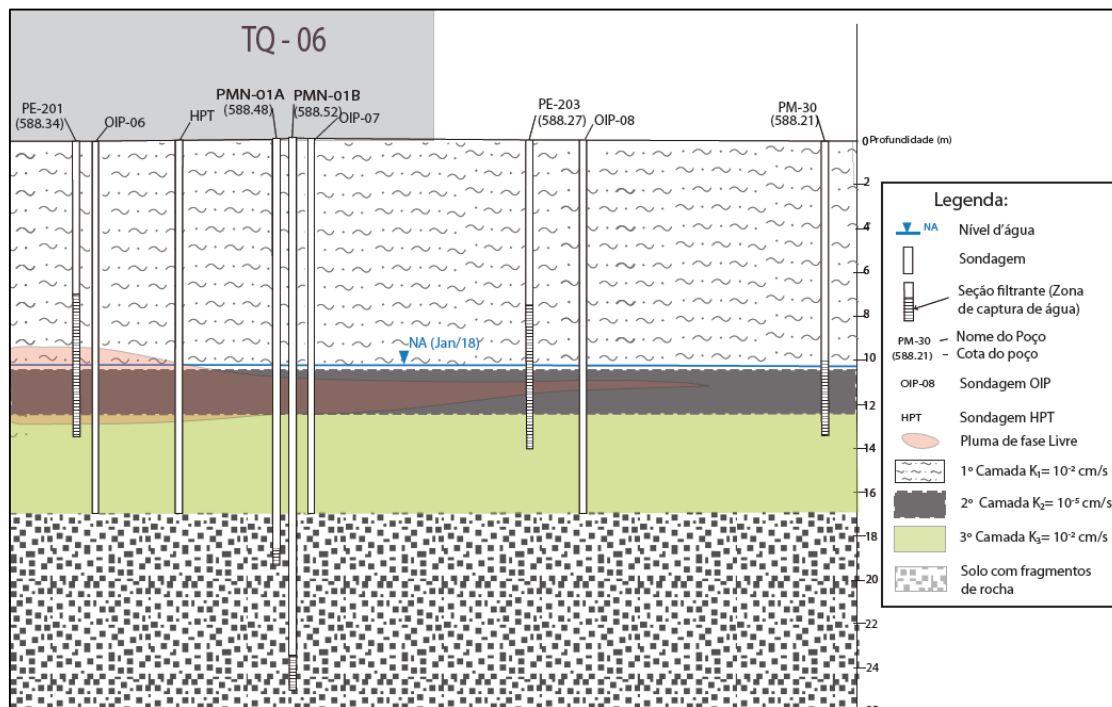


Figura 21 - Perfil das sondagens HPT e OIP.

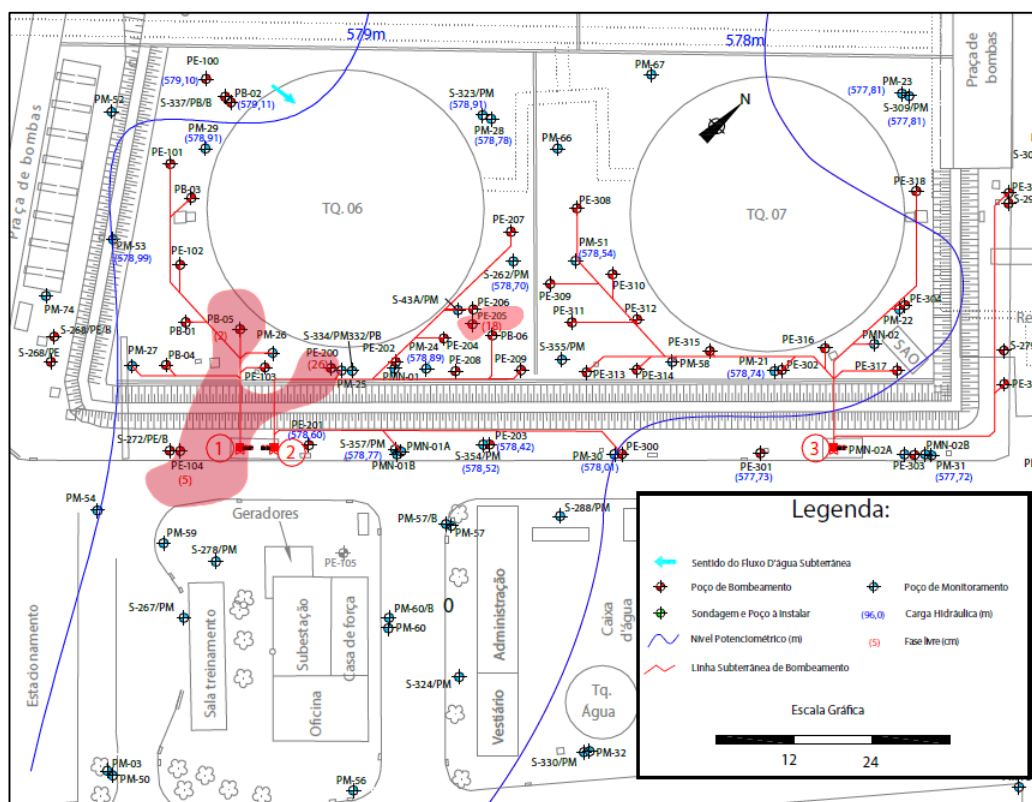


Figura 22 - Pluma de contaminação com potenciometria definida por métodos convencionais.

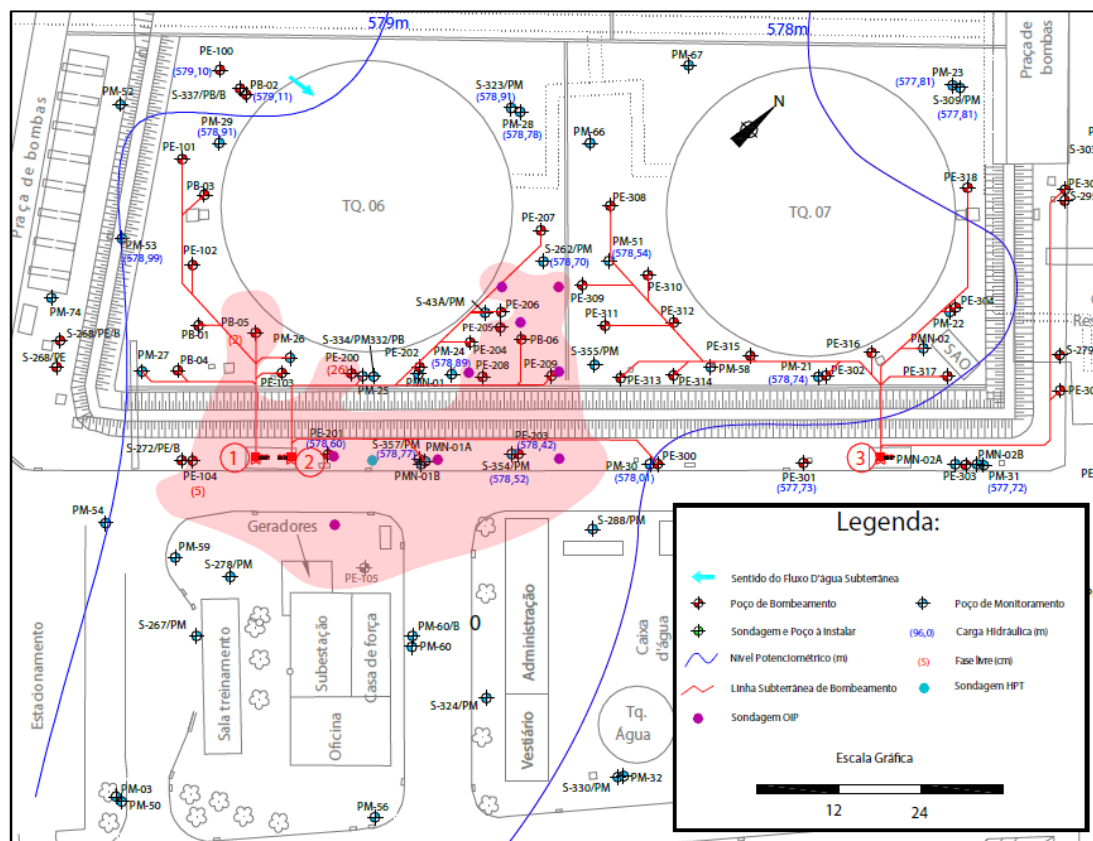


Figura 23 - Pluma contaminação por fase livre atualizada.

A conjugação dos resultados das investigações convencionais com a investigação de alta resolução resultou numa pluma de contaminação muito maior, totalizando 1640m² aproximadamente.

5.6 Avaliação do Uso de Diferentes Técnicas de Investigação na elaboração de MCAs

Os resultados identificaram a presença de contaminantes e sua fonte é provavelmente o tanque 6. Além disso, também se constatou a presença de uma camada de solo que reteve parte dos componentes oleosos, aumentando a área de contaminação de 366m² para 1640m², ou seja, mais que 400% de aumento na pluma de fase livre. Cabe ressaltar que a fase absorvida em uma região de variação de nível d'água pode provocar desaparecimento e reaparecimentos de fase livre (OLIVEIRA, 1998). Isso ocorre porque o contaminante fica aprisionado entre os poros do solo durante a estação seca, mascarando a sua presença. Quando o nível d'água volta a subir, a água desloca o LNAPL e o expulsa dos poros fazendo com que reapareça fase livre (OLIVEIRA, 1998).

Alguns poços de monitoramento localizados próximos as sondagens OIP estranhamente não indicaram presença de fase livre mesmo possuindo seção filtrante (zona de captura de água subterrânea) onde teoricamente está localizada a pluma. Há algumas possíveis explicações para isso. Talvez a pluma tenha se deslocado entre maio de 2017 (data da campanha de monitoramento) e janeiro de 2018 (data das sondagens investigativas de alta resolução) ou o contaminante está retido na camada isolante e, por isso, não foi detectada pelo poço. A hipótese do deslocamento da pluma é pouco provável, já que na camada onde foi identificada a maior concentração de contaminante oleoso possui permeabilidade menor que 10^{-5} cm/s. Isso indica que teria se deslocado entre maio e janeiro algo próximo a 1,3 m. Portanto, a hipótese mais aceita é de que o contaminante está na forma de fase absorvida.

A campanha de sondagem HPT-OIP foi capaz de identificar particularidades importantes da área como a camada selante com fase absorvida e a camada de maior permeabilidade abaixo da camada selante. Essa heterogeneidade não foi detectada antes, e seria muito útil para as avaliações dos projetos de remediação. Contudo, as nove sondagens não foram suficientes para delimitar as plumas na sua totalidade, principalmente no sentido de leste a oeste, onde a sondagem OIP-09 detectou a maior espessura de fase livre, além da camada selante. O que sugere, desse modo, que a pluma de contaminação possa ter se espalhado se deslocando além de onde está instalado a maioria dos poços e o sistema de extração multifásica.

Vale ressaltar que os custos envolvidos nas investigações com métodos de alta resolução são muito maiores que por métodos convencionais. E no que se referem ao caso estudado, outros métodos de investigação convencional de amostragem de solo - como *Direct Push* ou trado helicoidal oco (*Hollow stem auger*) - talvez fossem capazes de detectar a camada selante e a fase retida. Em casos mais simples, como pequenos vazamentos com plumas de pequena área e litologia razoavelmente homogênea, os resultados por métodos convencionais seriam capazes de fornecer um Modelo Conceitual de Área (MCA) adequado, o que justificaria a não aplicação de métodos de alta resolução. Entretanto, Suthersan demonstra em diversos estudos de caso que há uma economia global na remediação de aproximadamente sete vezes sobre o que é investido nas etapas de investigação (SUTHERSAN et al, 2015, apud RIYIS et al, 2017). Portanto, a escolha da abordagem mais adequada varia caso a caso.

6 Conclusão

A investigação convencional não foi capaz de detectar massas de contaminante em fase livre que estavam retidas em camada confinante no solo, mesmo com uma vasta rede de poços de monitoramento que incluíam poços profundos. Em função disso, algumas heterogeneidades da área de estudo também não constavam no modelo conceitual de área, o que tornaria a remediação ineficiente e mais custosa.

É importante destacar que as investigações de alta resolução HPT e OIP se mostraram ferramentas poderosas para a localização e entendimento da contaminação no meio físico. Provavelmente a pluma localizada na camada permeável abaixo da camada selante se espalhou horizontalmente. No entanto, uma única campanha de investigação não foi suficiente para o completo entendimento da dispersão do contaminante e mais estudos na área se fazem necessários.

Em suma, os resultados obtidos reafirmam a necessidade da aplicação de ferramentas com maior nível de detalhamento como sondagens HPT e OIP, para fornecer melhores subsídios aos tomadores de decisão e garantir projetos de remediação mais eficientes.

Referência Bibliográfica

AMARAL, Isabela Campos Costa et al. **Avaliação ambiental de BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos) e biomarcadores de genotoxicidade em trabalhadores de postos de combustíveis.** Revista brasileira saúde ocup. 2017, vol.42. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2317-6369000124515>>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENTIDADES ESTADUAIS DE MEIO AMBIENTE. **Fase livre: Processos de remoção e gerenciamento** apresentação. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/04_fase_livre_vabema.pdf>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 06.502:** Rochas e solos– Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 06.484:** Solos – Sondagens simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 09.603:** Sondagens a trado - Procedimento. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.492:** Sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.515:** Passivo ambiental em solo e água subterrâneo – Parte 1: Investigação preliminar, 2007.

CAMPOS, Antônio Carlos. **Cartografia Básica – Aula 10: Medições planimétricas: precisão e generalização.** Universidade Federal de Sergipe - Centro de Educação Superior a Distância. São Cristóvão, 2007.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 420, 28 de dezembro de 2009.** Dispõe sobre critério e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, 2009.

COMPANHIA DE AMBIENTAL DE ESTADO DE SÃO PAULO. **Sistema de licenciamento de postos–Procedimento para a avaliação de gases no solo.** São Paulo, 2007.

COMPANHIA DE AMBIENTAL DE ESTADO DE SÃO PAULO. **Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo - Texto explicativo.** São Paulo, 2017.

COSTA, Walter Duarte. **Problemas relacionados com a investigação da contaminação produzida por hidrocarbonetos do petróleo**. Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste – XIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 2003.

FINKLER AMBIENTAL. **Relatório de instalação do sistema de remediação ambiental (Jul/16)**. Novembro de 2016.

FINKLER AMBIENTAL. **Resultados de investigação ambiental “Piloto” de alta resolução (HRSC) com uso de tecnologia OIP e HPT com redefinição de modelo conceitual na futura zona de ensaio piloto de aplicação de surfactante**. Apresentação. Janeiro de 2018.

FINKLER AMBIENTAL. **Relatório de operação dos sistemas de remediação ambiental (Abr/17 a Jun/17)**. Agosto de 2017.

FREIRE, Priscyla Aparecida de Campos. **Bombeamento e tratamento da fase livre em aquífero litorâneo** – artigo técnico. Vol.19 Revista de engenharia Sanitaria e Ambiental. 2014.

HANSEN, Éverton. **Tecnologias de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos** – dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química, 2013.

HASAN, S. E. **Geology and Hazardous Waste management**. Pentice-Hall. Nova Jersey, 1996.

MARQUES, E. M.; GUERRA, A. J. T. **Solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo - artigo**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/7/0109.pdf>>.

OLIVEIRA, E. et al. **Efeitos da variação do nível d’água em fase livre de gasolina pura e de gasolina com etanol - artigo**. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1998.

RIYIS, Marcos Tanaka. **Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o Piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução: Marcos Tanaka Riyis**. 2012. 149 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/92963>>.

RIYIS, Marcos Tanaka et al. **Avaliação das falhas no modelo conceitual de uma área contaminada utilizando investigação com métodos convencionais**. Revista InterfacEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade, v. 12, n. 1, 2017.

RIYIS, Marcos Tanaka et al. **Investigação geoambiental de áreas contaminadas com elaboração de modelo conceitual em campo utilizando ferramentas de alta resolução (HRSC)**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental, v. 3, n. 1, p. 125-137, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/135309>>.

SANTOS, Aline Diorio dos Santos et al. **Aprimoramento de modelo conceitual da área através do uso de ferramentas de investigação de alta resolução**. Centro universitário SENAC – Curso de pós-graduação em Gerenciamento de Áreas Contaminadas. 2015.

SILVA, Alberto Bernd Lima. **Investigação geoambiental de uma áreas contaminada por resíduos industriais** – dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2001

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Groun Water Issue – Light Nonaqueous Phase Liquids**. Estados Unidos da América: 2015. Disponível em:<<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/lnapl.pdf>>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **High Resolution Site Characterization. Characterization and Monitoring Technologies**. Estados Unidos da América: 2016. Disponível em:<<https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc>>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **High Resolution Site Characterization. Key Optimization Components**. Estados Unidos da América: 2016. Disponível em:<https://clu-in.org/optimization/components_csm.cfm>

VINHOZA, Monica Maria Jorge. **Estudo do comportamento dos metais chumbo e mercúrio na presença do 1-dodecanotiol e do ácido hexanóico em matriz de hidrocarbonetos**. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015.

VALENTIN, Leonardo Antônio. **Boas práticas de laboratório: Aplicação para avaliar o impacto ambiental causado pelo derrame de derivados de petróleo** – Dissertação(mestrado). Universidade de São Paulo, Instituto de química de São Carlos, 2006.